



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΣΤΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

Πλοήγηση ρομπότ με χρήση της φορητής κάμερας

Στυλιανός Μουρατίδης

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπεύθυνος

Δελήμπασης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Πλαγιανάκος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Λαμία, 2016



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ
ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ

Πλοήγηση ρομπότ με χρήση της φορητής κάμερας

Στυλιανός Μουρατίδης

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων/σα

Δελήμπασης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής
Πλαγιανάκος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Λαμία, 2016

Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσιάσή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία:/...../20.....

Ο – Η Δηλ.

(Υπογραφή)

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.

Πλοήγηση ρομπότ με χρήση της φορητής κάμερας

Στυλιανός Μουρατίδης

Τριμελής Επιτροπή:

Δελήμπασης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Πλαγιανάκος Βασίλειος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιακωβίδης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής

1. Εισαγωγή

1.1. Βασικές αρχές πλοήγησης ρομπότ

Στον τομέα της υπολογιστικής ρομποτικής, η ικανότητα της αυτόματης πλοήγησης ρομπότ έχει γίνει σχεδόν αναγκαία λόγω του μεγάλου εύρους εφαρμογών της ρομποτικής. Η αυτόματη αναγνώριση αντικειμένων, σχημάτων και η δυνατότητα χαρτογράφησης ενός χώρου με τη χρήση ρομπότ είναι εφικτά και αποτελούν προβλήματα τα οποία λύνονται. Συνήθως, για την αυτόματη πλοήγηση ρομπότ, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε κάποια χαρακτηριστικά του χώρου, όπως το βάθος, οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων και την κίνηση της κάμερας. Υπάρχουν πολλοί υλοποιημένοι μέθοδοι για την πλοήγηση ρομπότ.

Σε κάποιες περιπτώσεις, για πλοήγηση ρομπότ σε εσωτερικούς χώρους, χρησιμοποιείται ρομπότ που είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες μέτρησης απόστασης [9]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι αισθητήρες λαμβάνουν πληροφορίες για την απόσταση κάποιων εμποδίων στο χώρο, τα οποία χαρτογραφούνται και με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται [10][11].

Η χρήση του Kinect και άλλων αισθητήρων βάθους εμφανίζεται σε πολλές μεθόδους. Το Kinect, μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε μετρήσεις για την απόσταση της σκηνής από τον αισθητήρα, αλλά και εικόνα. Αυτό είναι ιδιαίτερος χρήσιμο για μεθόδους χαρτογράφησης και πλοήγησης σε εσωτερικούς χώρους [15][16][17].

Υπάρχουν μέθοδοι που χρησιμοποιούν τεχνολογία αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων από απόσταση με τη χρήση ενός πομπού/δέκτη (reader) και ετικετών (tags). Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται RFID και είναι ουσιαστικά ένα σύστημα που αποτελείται από πολλές ετικέτες διαμοιρασμένες στο χώρο [19][20]. Αυτές οι ετικέτες είναι κυκλώματα με μια κεραία με δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων με άλλες ετικέτες ή το κύκλωμα πομπού/δέκτη. Με αυτό τον τρόπο, ένα ρομπότ που έχει εγκατεστημένο ένα κύκλωμα πομπού/δέκτη, μπορεί να παίρνει πληροφορίες από μια ετικέτα, ώστε να γνωρίζει σε ποιο σημείο του χώρου βρίσκεται και να διαμοιράζει αυτή τη πληροφορία μέσω του πομπού σε ένα σύστημα που χαρτογραφεί τη πορεία του ρομπότ [18].

Μια παρόμοια μέθοδος πλοήγησης ρομπότ, χρησιμοποιεί σήμα Wi-Fi [23]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, ένας αλγόριθμος υπολογίζει τη θέση που βρίσκεται το ρομπότ με βάση το χρόνο που χρειάστηκε ένα σήμα να φτάσει σε αυτό [21][23]. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε εσωτερικούς χώρους [22].

Άλλες μέθοδοι στηρίζονται στη χρήση 2 καμερών (stereo vision). Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε εξωτερικό περιβάλλον [12][13]. Με τη χρήση 2 καμερών, υπολογίζεται το βάθος του πλάνου που είναι προσανατολισμένες οι κάμερες και οι μετρήσεις έχουν μεγάλη ακρίβεια [14].

Υπάρχουν όμως και μέθοδοι για πλοήγηση και εντοπισμό θέσης του ρομπότ με τη χρήση μιας κάμερας. Υπάρχουν διάφορες αλγοριθμικές προσεγγίσεις στη μέθοδο. Για παράδειγμα, μπορούμε να ανακατασκευάσουμε ένα μοντέλο του χώρου στο οποίο βρίσκεται η κάμερα μέσω της κίνησης που κάνει (Structure from Motion) [24] [26].

Άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούν μια ευρυγώνια κάμερα σε στατική θέση, για υπολογισμό θέσης ενός ρομπότ [25]. Όπως επίσης άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούν εικόνες με μοτίβα τα οποία αναγνωρίζονται από τη κάμερα [28]. Ανάλογα με το μοτίβο που αναγνωρίζεται, μπορούμε να γνωρίζουμε και τη θέση του ρομπότ [27] [28] [29].

Χρησιμοποιώντας δύο κάμερες που γνωρίζουμε την μεταξύ τους απόσταση ή με χρήση αισθητήρα βάθους, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τον τρισδιάστατο χώρο όπου είναι προσανατολισμένο το σύστημά μας. Η χρήση όμως πολλαπλών καμερών ή η χρήση αισθητήρα μπορεί να αυξήσουν το κόστος ή τη δυνατότητα χρησιμοποίησης οποιασδήποτε κάμερας για αυτόματη πλοήγηση ενός ρομπότ. Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική μελέτη και η υλοποίηση ενός αλγορίθμου που υπολογίζει τη θέση και τον προσανατολισμό μίας φορητής κάμερας.

Στη μέθοδό μας χρησιμοποιούμε μια άγνωστη φορητή κάμερα, την οποία αρχικά τη βαθμονομούμε και στη συνέχεια, μέσα από κάποια γνωστά σημεία στο χώρο, μπορούμε να υπολογίσουμε τη θέση και τον προσανατολισμό της με τη χρήσης μιας μόνο εικόνας. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε κάμερα για να λειτουργήσει το σύστημα μας και να μπορέσουμε να γνωρίζουμε τη θέση της στο χώρο, για κάθε εικόνα που αποκτάμε από αυτή. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαδρομή που ακολούθησε η κάμερα στο χώρο κατά τη πλοήγησή της. Αναγκαίο βήμα για να πετύχουμε όλα τα παραπάνω είναι μια διαδικασία που ονομάζεται βαθμονόμηση κάμερας μέσω της οποίας υπολογίζουμε τις εσωτερικές και εξωτερικές παραμέτρους της.

1.2. Αναγκαιότητα βαθμονόμησης κάμερας

Η βαθμονόμηση της κάμερας είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζουμε τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας, όπως το εύρος πεδίου, η εστιακή απόσταση, η κυρτότητα του φακού και αντιστοίχιση κάθε σημείου μιας εικόνας με το αντίστοιχο σημείο του αισθητήρα.

Στη μέθοδό μας ακολουθούμε το μοντέλο βαθμονόμησης του Roger Y. Tsai [2], ο οποίος περιγράφει τη βαθμονόμηση μιας κάμερας μέσω γνωστών *μη-συνεπίπεδων* σημείων στο χώρο. Τις περισσότερες φορές, κάποιες από τις παραπάνω πληροφορίες παρέχονται από τον κατασκευαστή. Σε όσες κάμερες δεν γνωρίζουμε τις εσωτερικές παραμέτρους όμως, πρέπει να ακολουθήσουμε τη διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας ώστε να μπορέσουμε αργότερα να υπολογίσουμε τις εξωτερικές παραμέτρους της [2][3][4].

Έχοντας υπολογίσει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας, πλέον μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε τις εξωτερικές παραμέτρους, οι οποίες είναι η θέση της κάμερας αλλά και ο προσανατολισμός της στο χώρο. Λόγω της πολυπλοκότητας του υπολογισμού του προσανατολισμού της κάμερας στο χώρο, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 2, συνήθως πρέπει να γνωρίζουμε και κάποιες περαιτέρω πληροφορίες για τον χώρο στο οποίο βρίσκεται η κάμερα. Για παράδειγμα, αν γνωρίζουμε μια θέση στο χώρο και γνωρίζουμε και το προσανατολισμό της κάμερας στο χώρο, με μια αλλαγή προσήμου στο πίνακα περιστροφής κατά κάποιο άξονα, θα έχουμε το ακριβώς αντισυμμετρικό σημείο στο χώρο. Συνήθως, αυτό είναι κάτι που, όπως και στη περίπτωση μας, δεν είναι ούτε ιδεατό, ούτε σωστό αλλά και ούτε πιθανό, όπως θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο 3.

1.3. Χρησιμότητα της μεθόδου της παρούσας πτυχιακής

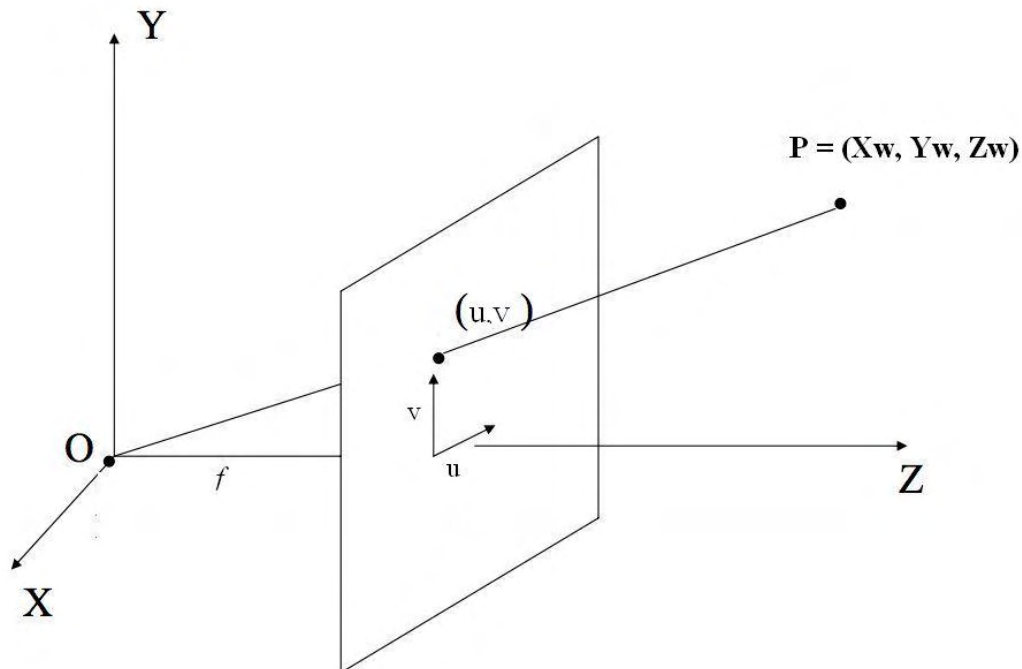
Με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παρούσα πτυχιακή, υλοποιήσαμε την βαθμονόμηση μιας άγνωστης κάμερας, γνωρίζοντας την θέση ενός αριθμού γνωστών σημείων του χώρου. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την βαθμονόμηση για να υπολογίζουμε τη θέση και προσανατολισμό της κάμερας στο χώρο, έχοντας μία εικόνα του χώρου που περιέχει τα γνωστά σημεία. Επομένως είναι δυνατό να πλοηγήσουμε ένα ρομπότ με δεδομένα που δεχόμαστε μέσω μιας οποιασδήποτε κάμερας που μπορεί να είναι προσαρμοσμένη πάνω σε ένα ρομπότ. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται η ανάκτηση των θέσεων και του προσανατολισμού κατά μήκος μίας τροχιάς της κάμερας στο χώρο του πανεπιστημίου.

2. Μεθοδολογία Βαθμονόμησης Κάμερας (Camera Calibration)

2.1. Μαθηματικό Μοντέλο Κάμερας

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαδικασία της βαθμονόμησης της κάμερας, πρέπει να αναλύσουμε το μαθηματικό μοντέλο σχηματισμού εικόνας από την κάμερα. Ουσιαστικά αυτό περιγράφει την προβολή ενός αντικειμένου από το τρισδιάστατου συστήματος του κόσμου, στον αισθητήρα της κάμερας (Σχ.1).

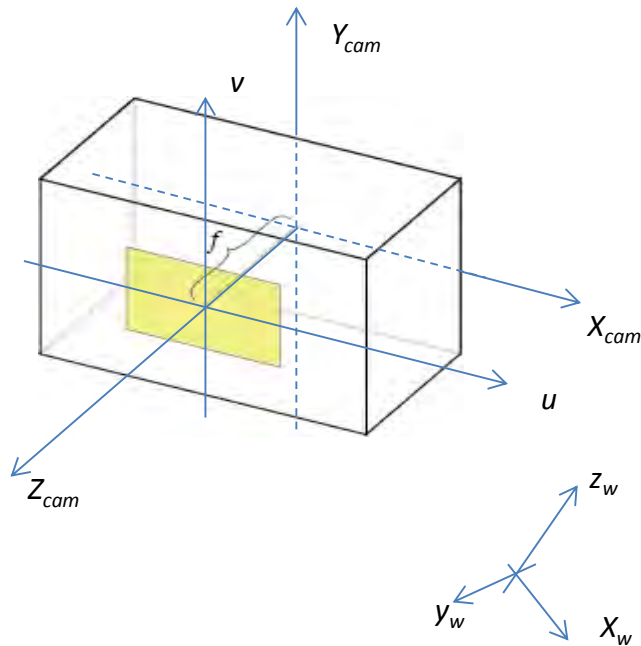
Έστω $\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w)$ η θέση του αντικειμένου στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας και (u, v) το σημείο προβολής του αντικειμένου στον αισθητήρα της κάμερας. Με f συμβολίζουμε την εστιακή απόσταση, δηλ. την απόσταση του σημείου προβολής O από το κέντρο συντεταγμένων της κάμερας



Σχήμα 1.

Γραφική αναπαράσταση του μαθηματικού μοντέλου της κάμερας (προσαρμοσμένο από [1]).

Στο Σχήμα 1 φαίνεται μια κάμερα με κέντρο προβολής το σημείο O . Η εστιακή απόσταση f είναι η απόσταση του φακού από τον αισθητήρα της κάμερας. Στο μοντέλο της κάμερας, το f ως προς τον άξονα x και ως προς το y είναι το ίδιο. Αυτό όμως δε συμβαίνει και σε όλες τις κάμερες. Σε ότι αφορά το f στον άξονα z , αυτό εξαρτάται από το ζουμ της κάμερας. Στο δικό μας μοντέλο, η απόσταση μεταξύ φακού και αισθητήρα δεν αλλάζει, επομένως η εστιακή απόσταση παραμένει σταθερή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2

Σχηματική αναπαράσταση των συστημάτων συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση της κάμερας.

Ένα σημείο $\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w)$ του τρισδιάστατου χώρου προβάλλεται στο σημείο (u, v) επί του αισθητήρα της κάμερας. Η θέση της προβολής εξαρτάται από τις εξωτερικές παραμέτρους της κάμερας (θέση και προσανατολισμό της στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου). Κάθε σημείο του 3D χώρου αντιστοιχίζεται με ένα pixel της εικόνας με αντίστοιχη θέση (u, v) . Αν $\mathbf{P}_{cam} = (x_{cam}, y_{cam}, z_{cam})$ οι συντεταγμένες του \mathbf{P}_w στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας, τότε χρησιμοποιώντας τη θεωρία του προβολικού μετασχηματισμού, μπορούμε να καταλήξουμε στις εξής σχέσεις που περιγράφουν το μοντέλο που συνδέουν το \mathbf{P}_{cam} με το (u, v) :

$$\frac{f}{z_{cam}} = \frac{u}{x_{cam}} = \frac{v}{y_{cam}} \quad (1)$$

από όπου μπορούμε να έχουμε:

$$u = \frac{f x_{cam}}{z_{cam}} \quad (2)$$

όπως επίσης:

$$v = \frac{fy_{cam}}{z_{cam}} \quad (3)$$

Το pixel (i,j) στο οποίο απεικονίζεται το σημείο \mathbf{P}_{cam} υπολογίζεται αν θεωρήσουμε ένα πίνακα K , που περιγράφει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας ως εξής:

$$K = \begin{pmatrix} a_x & s & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Τότε το (i,j) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} j \\ i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & s & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Συνήθως $s=0$, έτσι η (4) γίνεται

$$K = \begin{pmatrix} a_x & 0 & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η κάμερα βρίσκεται στη θέση $(-T_x, -T_y, -T_z)$ στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου, τότε ορίζεται το διάνυσμα μεταφοράς T , ως εξής:

$$T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ας θεωρήσουμε επίσης ένα 4x4 ορθοκανονικό πίνακα περιστροφής R , ο οποίος καθορίζει τον προσανατολισμό της κάμερας στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Τότε, το \mathbf{P}_w και το \mathbf{P}_{cam} συνδέονται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} x_{cam} \\ y_{cam} \\ z_{cam} \\ 1 \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Αν αντικαταστήσουμε το διάνυσμα μεταφοράς με πίνακα και τον συνδυάσουμε με τον R , η (9) μπορεί να γραφτεί σε ομογενείς συντεταγμένες, ως εξής:

$$\begin{pmatrix} x_{cam} \\ y_{cam} \\ z_{cam} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Ο πίνακας περιστροφής R μπορεί να αναλυθεί μέσω των περιστροφών Euler:

$$R = R_x \cdot R_y \cdot R_z \quad (11)$$

όπου R_x, R_y, R_z οι πίνακες περιστροφής γύρω από τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα, κατά γωνία $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ [2], [3]

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos(\theta_y) & -\sin(\theta_y) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_y) & \cos(\theta_y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Εκτός από γωνίες Euler, έχουν προταθεί και άλλοι τρόποι ανάλυσης του πίνακα περιστροφής, αλλά δε θα μας απασχολήσουν στην παρούσα πτυχιακή.

2.2. Βαθμονόμηση Κάμερας

Η βαθμονόμηση της κάμερας είναι μια διαδικασία με την οποία προσδιορίζουμε:

- τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας (το f και τα στοιχεία του πίνακα K) και
- τις εξωτερικές παραμέτρους της κάμερας: την θέση της και τον προσανατολισμό της στο χώρο, ισοδύναμα τα στοιχεία των πινάκων R, T .

Η βαθμονόμηση μπορεί να επιτευχθεί γνωρίζοντας τις συντεταγμένες ενός ελάχιστου πλήθους σημείων στο χώρο καθώς και τα pixel της εικόνας στα οποία εμφανίζονται τα σημεία αυτά. Πιο συγκεκριμένα:

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2), (3), (10) μπορούμε να ορίσουμε τις εξής δύο εξισώσεις για κάθε σημείο \mathbf{P}_w και την προβολή του (u,v) στο επίπεδο του αισθητήρα της κάμερας [2],[4], για $k: 1, 2, \dots, N$ ο αριθμός των γνωστών σημείων:

$$u_k = f \frac{r_{11}X_{w,k} + r_{12}Y_{w,k} + r_{13}Z_{w,k} + T_x}{r_{31}X_{w,k} + r_{32}Y_{w,k} + r_{33}Z_{w,k} + T_z} \quad (15)$$

$$v_k = f \frac{r_{21}X_{w,k} + r_{22}Y_{w,k} + r_{23}Z_{w,k} + T_y}{r_{31}X_{w,k} + r_{32}Y_{w,k} + r_{33}Z_{w,k} + T_z} \quad (16)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, διαιρώντας κατά μέλη καταλήγουμε:

$$\frac{u_k}{v_k} = \frac{r_{11}X_{w,k} + r_{12}Y_{w,k} + r_{13}Z_{w,k} + X_{cam}}{r_{21}X_{w,k} + r_{22}Y_{w,k} + r_{23}Z_{w,k} + Y_{cam}} \quad (17)$$

Από όπου, μετά από αλγεβρικές πράξεις, έχουμε:

$$(X_w v) r_{11} + (Y_w v) r_{12} + (Z_w v) r_{13} + X_{cam} v - (X_w u) r_{21} - (Y_w u) r_{22} - (Z_w u) r_{23} - Y_{cam} u = 0 \quad (18)$$

Δεδομένου επαρκούς πλήθους σημείων με γνωστά \mathbf{P}_w και (u,v) , η (18) αποτελεί γραμμικό σύστημα εξισώσεων με τους εξής 8 αγνώστους [4]:

$$r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, X_{cam}, Y_{cam}$$

Έτσι η (18) μπορεί να ξαναγραφεί σε μορφή πινάκων, ως εξής:

$$\bar{H} \cdot \bar{x} = \begin{pmatrix} v_1 x_{w_1} & v_1 y_{w_1} & v_1 z_{w_1} & v_1 & u_1 x_{w_1} & u_1 y_{w_1} & u_1 z_{w_1} & u_1 \\ v_2 x_{w_2} & v_2 y_{w_2} & v_2 z_{w_2} & v_2 & u_2 x_{w_2} & u_2 y_{w_2} & u_2 z_{w_2} & u_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_k x_{w_k} & v_k y_{w_k} & v_k z_{w_k} & v_k & u_k x_{w_k} & u_k y_{w_k} & u_k z_{w_k} & u_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ x_{cam} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ y_{cam} \end{pmatrix} = 0 \quad (19)$$

Το σύστημα γραμμικών εξισώσεων (19) είναι ομογενές. Ένα ομογενές σύστημα εξισώσεων έχει τουλάχιστον τη τετριμμένη μηδενική λύση. Αν $N > 8$ τότε η (19) αποτελεί ένα ομογενές υπερ-ορισμένο σύστημα. Αν θεωρήσουμε τον πίνακα

$$M = H^T H \quad (20)$$

τότε λύση του συστήματος αποτελεί το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του M , μέσω της διαδικασίας Singular Value Decomposition -SVD [1],[2]. Η SDV αναλύει ένα πίνακα $H_{m \times n}$ σε 3 πίνακες: ένα τετραγωνικό πίνακα $U_{m \times m}$, ένα διαγώνιο πίνακα $S_{m \times n}$ και τον ανάστροφο ενός πίνακα $V_{n \times n}^T$. Το θεώρημα παρουσιάζεται ως εξής:

$$H_{m \times n} = U_{m \times m} S_{m \times n} V_{n \times n}^T \quad (21)$$

όπου ισχύει ότι $U^T U = I$, $V^T V = I$, οι στήλες του U είναι ορθοκανονικά ιδιοδιανύσματα του HH^T , οι στήλες του V είναι ορθοκανονικά ιδιοδιανύσματα του $H^T H$ και ο S είναι ο διαγώνιος πίνακας που περιλαμβάνει της τετραγωνικές ρίζες των ιδιοτιμών των U ή V σε φθίνουσα σειρά [6].

Αν θεωρήσουμε H ένα πίνακα μεγέθους $[m \times n]$ και το \bar{x} ένα διάνυσμα μεγέθους $[n \times 1]$, τότε το ομογενές σύστημα έχει μια μη-προφανή και μοναδική λύση [5]. Έτσι, αν οι u, v είναι συντεταγμένες των σημείων του τρισδιάστατου χώρου στην εικόνα, έχουμε μοναδική λύση για τους 8 αγνώστους. Στη περίπτωση μας, λύση του ομογενούς συστήματος είναι το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη ελάχιστη ιδιοτιμή του πίνακα M [2][4]. Η λύση αυτή ταυτίζεται με το πρώτο διάνυσμα του Πίνακα $V_{n \times n}$ της Εξ. (21). Επομένως με τη λύση του ομογενούς συστήματος γνωρίζουμε πλέον τις τιμές των δύο πρώτων γραμμών του πίνακα περιστροφής R (δηλαδή τους αγνώστους $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$) και τη θέση της κάμερας στον άξονα x και στον άξονα y ($-T_x, -T_y$). Τα αποτελέσματα του πίνακα περιστροφής πρέπει να πολλαπλασιαστούν με ένα σταθερό όρο, που είναι η κλίμακα s του μετασχηματισμού. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα ομογενές σύστημα, οποιοδήποτε πολλαπλάσιο της μη μηδενικής λύσης αποτελεί επίσης λύση του συστήματος. Η κλίμακα προσδιορίζεται από την απαίτηση για ορθοκανονικότητα κάθε μίας από τις 2 πρώτες γραμμές:

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \quad (22)$$

από όπου προκύπτει:

$$s = \frac{1}{\sqrt{[r_{11}, r_{12}, r_{13}]' * [r_{11}, r_{12}, r_{13}]}} \quad (23)$$

Το s μπορεί να υπολογιστεί ισοδύναμα και από την απαίτηση η 2^η γραμμή του R να έχει μέτρο 1:

$$r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = 1 \quad (24)$$

Έτσι θέτουμε της σωστή κλίμακα στις τιμές των 8 αγνώστων:

$$\begin{aligned} r_{ij} &\leftarrow sr_{ij}, i = 1, 2, j = 1, 2, 3 \\ T_x &\leftarrow sT_x \\ T_y &\leftarrow sT_y \end{aligned} \quad (25)$$

Για να ανακτήσουμε τη τρίτη γραμμή του πίνακα περιστροφής (r_{31}, r_{32}, r_{33}), χρησιμοποιούμε το θεώρημα κατά το οποίο οι γραμμές του R πρέπει να είναι ορθοκανονικές. Επομένως κάνοντας εξωτερικό γινόμενο τη πρώτη με τη δεύτερη γραμμή του πίνακα περιστροφής, ανακτούμε τη τρίτη γραμμή (r_{31}, r_{32}, r_{33}) [4].

$$(r_{31}, r_{32}, r_{33}) = (r_{11}, r_{12}, r_{13}) \times (r_{21}, r_{22}, r_{23}) \quad (25)$$

Πλέον, με όλους τους αγνώστους να έχουν υπολογιστεί, για να βρούμε το Z_{cam} και την εστιακή απόσταση f , χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (15) και (16), λύνουμε πλέον, το (μη-ομογενές) σύστημα με διάνυσμα αγνώστων το f και το T_z [4].

$$\begin{pmatrix} (r_{11}X_{w,1} + r_{12}Y_{w,1} + r_{13}Z_{w,1} + T_x) & -u_1 \\ (r_{11}X_{w,2} + r_{12}Y_{w,2} + r_{13}Z_{w,2} + T_x) & -u_2 \\ \vdots & \vdots \\ (r_{11}X_{w,N} + r_{12}Y_{w,N} + r_{13}Z_{w,N} + T_x) & -u_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ T_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{31}X_{w,1} + r_{32}Y_{w,1} + r_{33}Z_{w,1} \\ r_{31}X_{w,2} + r_{32}Y_{w,2} + r_{33}Z_{w,2} \\ \dots \\ r_{31}X_{w,N} + r_{32}Y_{w,N} + r_{33}Z_{w,N} \end{pmatrix} \quad (26)$$

Η (26) είναι ένα υπερκαθορισμένο γραμμικό σύστημα που αν ξαναγραφεί ως:

$A \begin{pmatrix} f \\ T_z \end{pmatrix} = B$, επιλύεται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} f \\ T_z \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (26a)$$

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, οι εσωτερικές παράμετροι μιας κάμερας είναι τα στοιχεία του πίνακα K και η εστιακή απόσταση f , ισοδύναμα δε, μπορούν να προκύψουν από το f και το (φυσικό) μέγεθος του αισθητήρα. Συνήθως, η εστιακή

απόσταση και το μέγεθος του αισθητήρα δίνονται από τον κατασκευαστή. Εμείς δεν είχαμε αυτές τις πληροφορίες για την κάμερα που χρησιμοποιήσαμε, γνωρίζαμε μόνο ότι την αναλογία των pixel που είναι 640 (στήλες) x480 (γραμμές).

Επομένως, διεξήγαμε ένα πείραμα με γνωστές τις θέσεις των σημείων στο χώρο και τα αντίστοιχα pixel στην εικόνα. Επίσης γνωρίζαμε, την θέση της κάμερας και τον προσανατολισμό της. Έτσι υπολογίζουμε τις συντεταγμένες \mathbf{P}_{cam} για κάθε ένα από τα γνωστά σημεία στο σύστημα αξόνων της κάμερας, χρησιμοποιώντας την (10). Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις συντεταγμένες της προβολής των σημείων πάνω στον αισθητήρα (u,v) μέσω των σχέσεων (2) και (3). Τα στοιχεία του πίνακα K μπορούν να υπολογιστούν επιλύοντας τα εξής 2 υπερ-ορισμένα (μη-ομογενή) συστήματα γραμμικών εξισώσεων για $k=1,2,...,N$:

$$j_k = a_x j_{gt,k} + u_k \quad (27)$$

$$i_k = a_y i_{gt,k} + v_k \quad (28)$$

όπου (i_k, j_k) είναι οι συντεταγμένες των σημείων στα pixel της κάμερας, (u_k, v_k) είναι τα αντίστοιχα σημεία στον αισθητήρα της κάμερας όπως υπολογίσαμε πριν (27), (28).

Οι (27), (28) μπορούν να γραφούν σε μορφή πινάκων

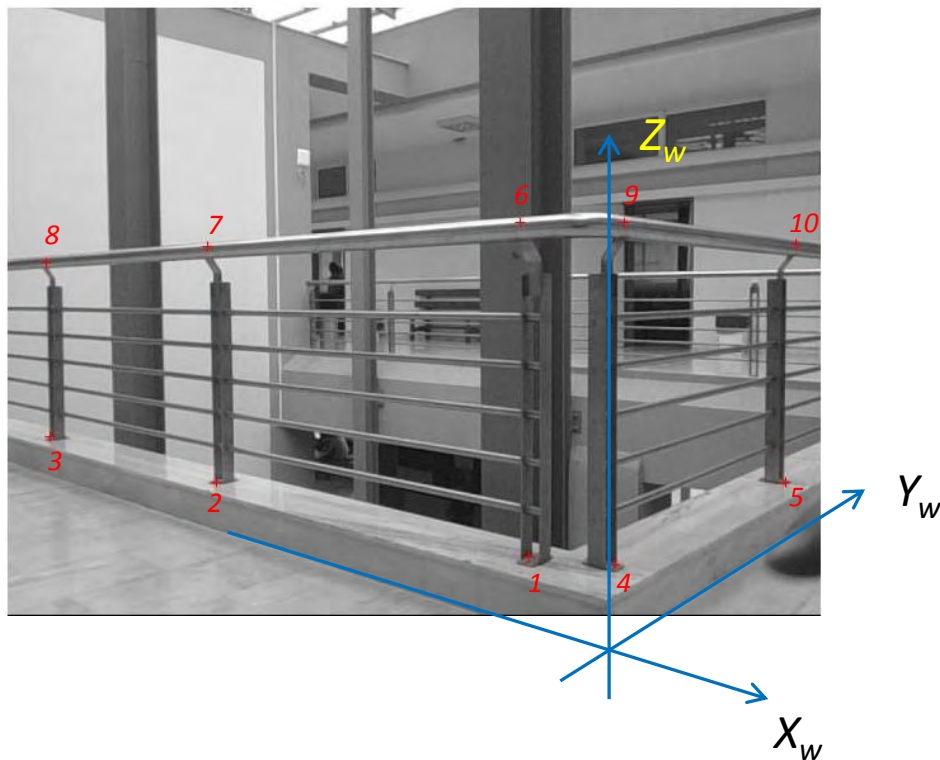
$$\begin{pmatrix} u_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ u_N & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ b_x \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} j_{gt,1} \\ \vdots \\ j_{gt,N} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} v_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ v_N & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_y \\ b_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} i_{gt,1} \\ \vdots \\ i_{gt,N} \end{bmatrix} \quad (30)$$

3. Αποτελέσματα

Για να διαπιστώσουμε τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου, διεξήγαμε μια σειρά από πειράματα που χωρίζονται σε δύο τμήματα. Πρώτα απαιτείται να υπολογίσουμε τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας και στη συνέχεια τις εξωτερικές παραμέτρους. Αρχικά καθορίσαμε το σύστημα αναφοράς του πραγματικού χώρου (X_w, Y_w, Z_w) , με άξονες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.

Επιλέξαμε 10 μη συνεπίπεδα σημεία στο χώρο, των οποίων μετρήσαμε τις συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς (X_w, Y_w, Z_w) , τα οποία φαίνονται με κόκκινο σταυρό και αριθμημένα στο Σχήμα 3. Για διάφορες θέσεις και προσανατολισμούς της κάμερας, λαμβάνεται μία εικόνα που περιέχει τα 10 σημεία με τις γνωστές συντεταγμένες. Οι λήψεις αυτές χρησιμοποιούνται είτε για καθορισμό των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας, αν η θέση είναι γνωστή, είτε για καθορισμό της άγνωστης θέσης και του προσανατολισμού της.



Σχήμα 3. Το σύστημα αναφορά του χώρου που επιλέχθηκε και τα γνωστά σημεία που χρησιμοποιήσαμε.

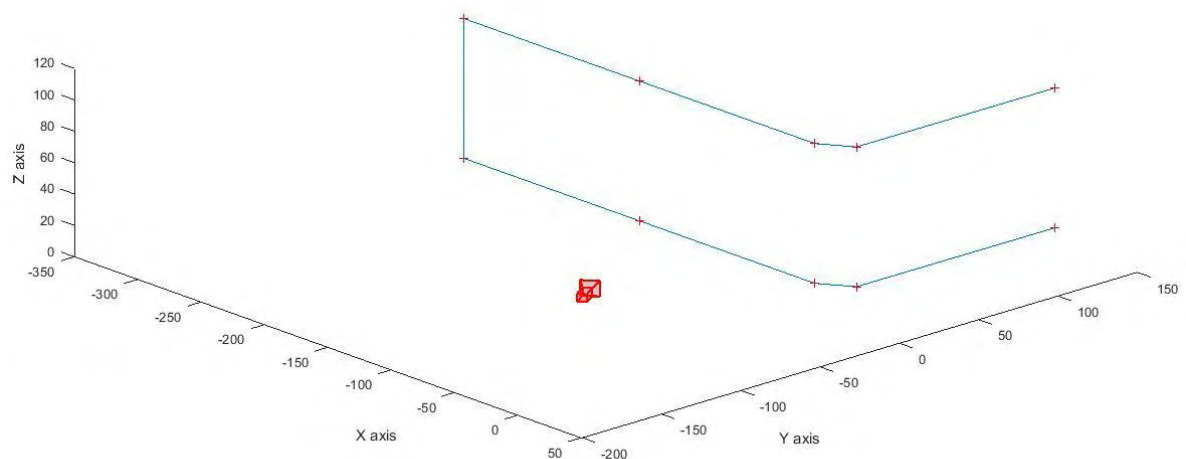
Μοναδική προϋπόθεση για να μπορούμε να πάρουμε μια λήψη και να υπολογίσουμε τη θέση και προσανατολισμό της κάμερας, είναι να υπάρχουν όλα τα σημεία που έχουμε επιλέξει στη λήψη. Πήραμε δέκα σημεία στο χώρο και μετρήσαμε τις

συντεταγμένες τους. Όπως αναφέρθηκε στο κεφ.2, είναι απαραίτητο τα σημεία στο χώρο μας να είναι περισσότερα από οχτώ. Συγκεκριμένα οι θέσεις των σημείων που χρησιμοποιήσαμε είναι:

Πίνακας 1. Συντεταγμένες των σημείων του χώρου που επιλέχθηκαν, στο σύστημα αναφοράς του Σχήμα. 3.

Σημείο	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	-28	9	13
2	-166	9	13
3	-305	9	13
4	-9	20	13
5	-9	145	13
6	-28	9	102
7	-166	9	102
8	-305	9	102
9	-9	20	102
10	-9	145	102

Παρουσίαση Πειράματος



Σχήμα 4

Γραφική αναπαράσταση της διάταξης των πειραμάτων.

Εφόσον δημιουργήσαμε ένα σύστημα συντεταγμένων όπου μπορούμε να μετρήσουμε την απόσταση κάθε σημείου από το μηδέν, τοποθετήσαμε την κάμερα σε θέσεις που γνωρίζαμε τις συντεταγμένες για να διεξάγουμε πειράματα, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Σχήμα 4

3.1. Υπολογισμός εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας

Για τον υπολογισμό των εσωτερικών παραμέτρων, χρησιμοποιήσαμε μια λήψη στην οποία γνωρίζαμε τη θέση, τον προσανατολισμό της κάμερας και τη θέση των σημείων στο χώρο. Επιπλέον, η σωστή θέση των pixel για κάθε ένα από τα σημεία του χώρου $(i_{gt,k}, j_{gt,k})$ έχει βρεθεί χειροκίνητα.

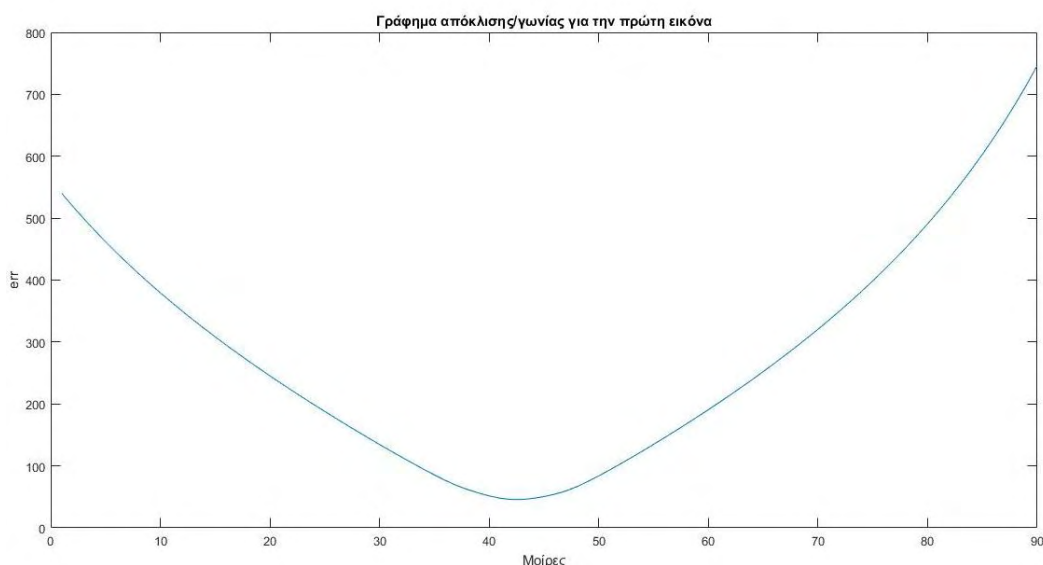
Πίνακας 2. Συντεταγμένες των pixel της εικόνας για τη λήψη του Σχήματος 3

Σημείο	i_{gt}	j_{gt}
1	411	433
2	164	374
3	33	339
4	477	439
5	613	374
6	403	169
7	157	188
8	30	202
9	486	169
10	620	187

Για να γνωρίζουμε με ακρίβεια τη γωνία με την οποία ήταν προσανατολισμένη η κάμερα στο χώρο, χρησιμοποιήσαμε μια εξαντλητική επαναληπτική μέθοδο αναζήτησης της γωνίας γύρω από τον άξονα z. Συγκεκριμένα, θεωρήσαμε της γωνίες θ_x, θ_y να είναι μηδέν και τη κάμερα να περιστρέφεται μόνο γύρω από το z. Για κάθε θ_z υπολογίζουμε τον πίνακα R βάσει των (11), (12), (13) και (14) και στη συνέχεια μέσω των σχέσεων (27) και (28) υπολογίζουμε την επαναπροβολή των σημείων $(j_{gt,k}, i_{gt,k})$ του χώρου στον αισθητήρα της κάμερας (i_k, j_k) . Δημιουργήσαμε μια μέθοδο υπολογισμού λάθους, όπου για κάθε γωνία, υπολογίζαμε την απόσταση μεταξύ των τιμών $(j_k, j_{gt,k})$ και των $(i_k, i_{gt,k})$ των σχέσεων (27), (28).

$$err = \sum_k \sqrt{(j_k - j_{gt,k})^2 + (i_k - i_{gt,k})^2} \quad (35)$$

Η γωνία που επιλέγαμε τελικά ήταν αυτή που αντιστοιχούσε στη τιμή του err με το ελάχιστο άθροισμα αποστάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Γραφική αναπαράσταση απόκλισης με γωνία κάμερας

3.2. Εύρεση θέσης και προσανατολισμού κάμερας

Αφού βρήκαμε τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμεράς μας, μπορούμε να βρούμε και την θέση της στο χώρο. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, μετακινούσαμε την κάμερα στο χώρο και την περιστρέφαμε αναλόγως ώστε να βρίσκονται εντός πλάνου τα 10 σημεία του χώρου που είχαμε επιλέξει. Για κάθε θέση που παίρναμε μια λήψη, σημειώναμε τις συντεταγμένες της κάμερας στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου (Πίνακας 1), ώστε να μπορούμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Η μέτρηση της γωνίας για κάθε εικόνα όμως δε μπορούσε να γίνει με ακρίβεια. Για να γνωρίζουμε τη γωνία με την οποία ήταν περιστρεμμένη η κάμερα για κάθε λήψη, εφαρμόσαμε τη μέθοδο υπολογισμού λάθους που περιγράφεται στη Σχέση (35). Οι γωνίες που υπολογίσαμε για τις 7 εικόνες είναι οι εξής:

Πίνακας 3. Οι γωνίες για κάθε εικόνα

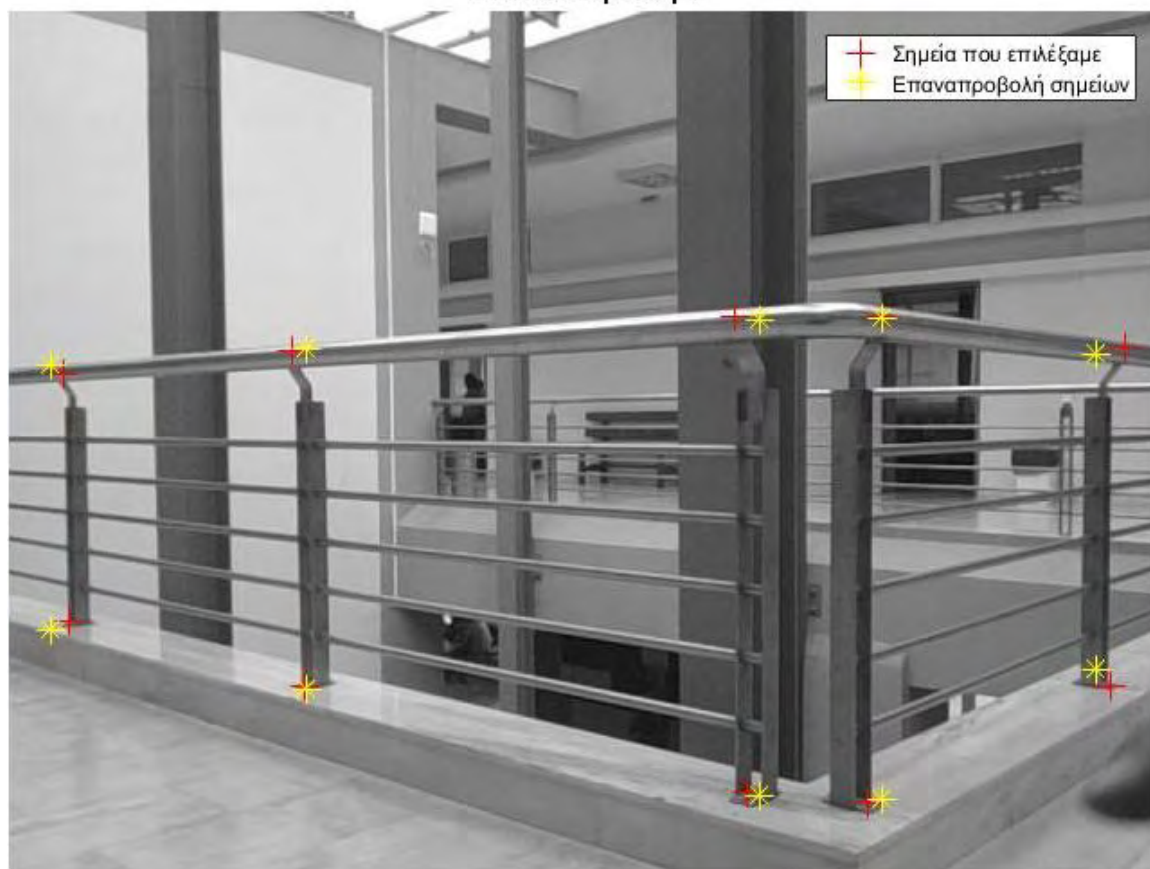
Γωνία θ_z (μοίρες)	
Εικόνα 1	41.8
Εικόνα 2	44.6
Εικόνα 3	48.4
Εικόνα 4	48.0
Εικόνα 5	35.8

Εικόνα 6 35.2

Εικόνα 7 34.6

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε το Σχήμα 3 και υπολογίσαμε τις σχέσεις (21),(22) όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2. Επομένως, μπορούμε με βάση τις παραπάνω σχέσεις να επαναπροβάλλουμε τις συντεταγμένες των σημείων πάνω στην εικόνα. Για κάθε εικόνα, η επαναπροβολή των σημείων στην εικόνα, είναι οι εξής:

Εικόνα στη θέση 1



Εικόνα στη θέση 2



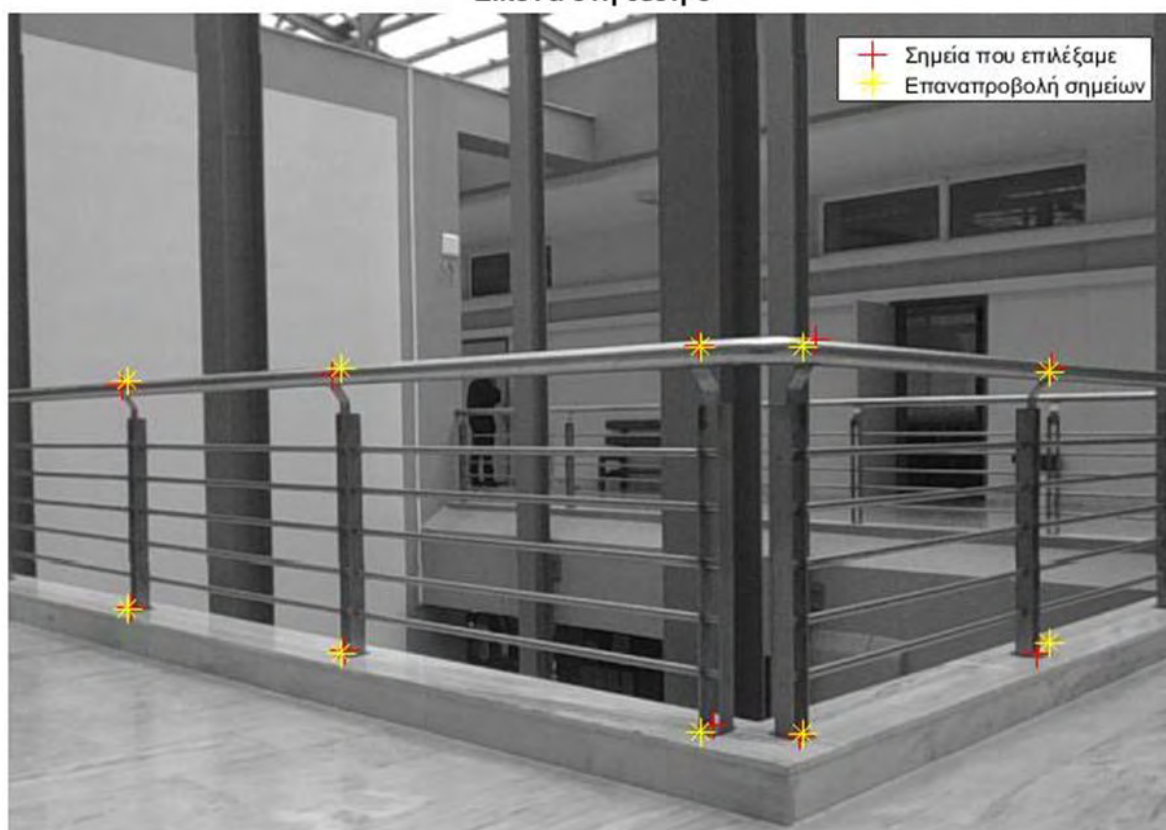
Εικόνα στη θέση 3



Εικόνα στη θέση 4



Εικόνα στη θέση 5



Εικόνα στη θέση 6



Εικόνα στη θέση 7



Στις παραπάνω εικόνες, παρατηρούμε ότι, η επαναπροβολή των σημείων δεν γίνεται με απόλυτη ακρίβεια. Αυτό οφείλεται σε σφάλματα των μετρήσεων των συντεταγμένων του χώρου [2] ή/και στην απλότητα του μαθηματικού μοντέλου της κάμερας που χρησιμοποιήσαμε.

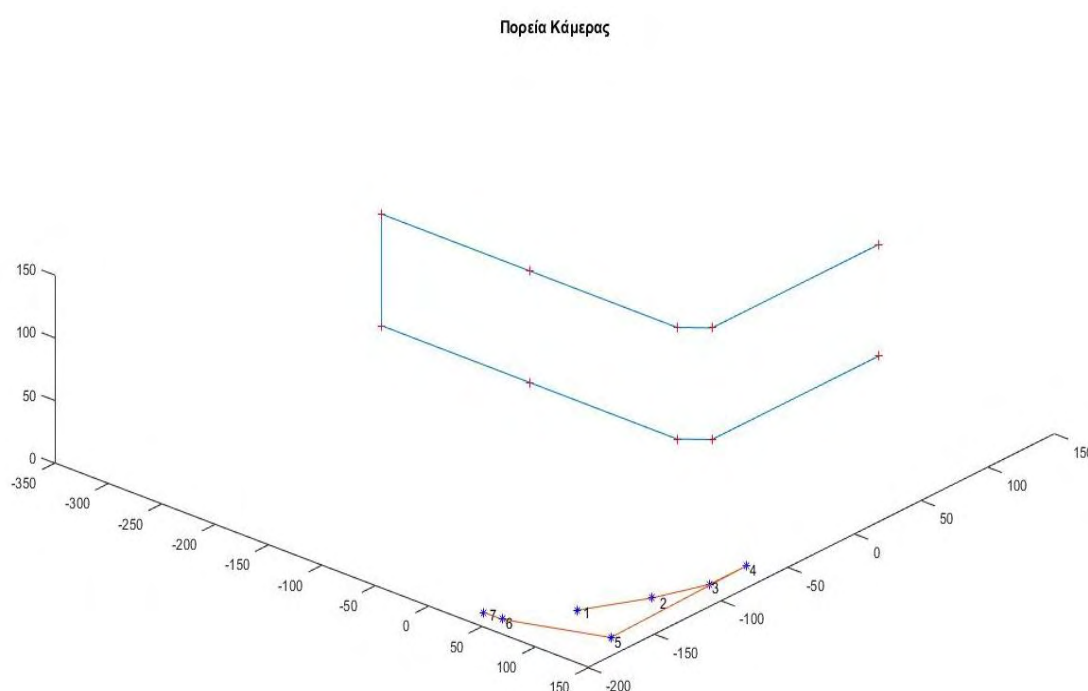
Έχοντας υπολογίσει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας, μπορούμε να υπολογίσουμε τις εξωτερικές παραμέτρους μέσω των σχέσεων (14),(15),(16) όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 2. Σε ότι αφορά την απόκλιση του υπολογισμού θέσης και προσανατολισμού της κάμερα σε σχέση με τις πραγματικές θέσεις, η απόκλιση είναι αρκετά μικρή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Οι πραγματικές θέσεις της κάμερας, οι υπολογιζόμενες θέσεις της κάμερας μέσω της μεθόδου που ακολουθήθηκε και τα μέσα σφάλματα

Θέση κάμερας		
Εικόνα	Πραγματική	Υπολογισμένη
1	[83,-155,83]	[79,-151,86]
2	[110,-120,83]	[95,-104,91]

3	[126,-90,83]	[105,-79,88]
4	[126,-62,83]	[115,-60,85]
5	[130,-167,83]	[126,-171,85]
6	[53,-187,83]	[53,-187,83]
7	[36,-187,83]	[44,-193,83]

Επομένως, έχοντας υπολογίσει τη θέση στην οποία βρισκόταν η κάμερα για κάθε λήψη, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα χάρτη με τη διαδρομή που ακολούθησε. Οι εφτά θέσεις που πραγματοποιήσαμε λήψεις απεικονίζονται στο Σχήμα 6:



Σχήμα 6. Θέσεις της κάμερας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων

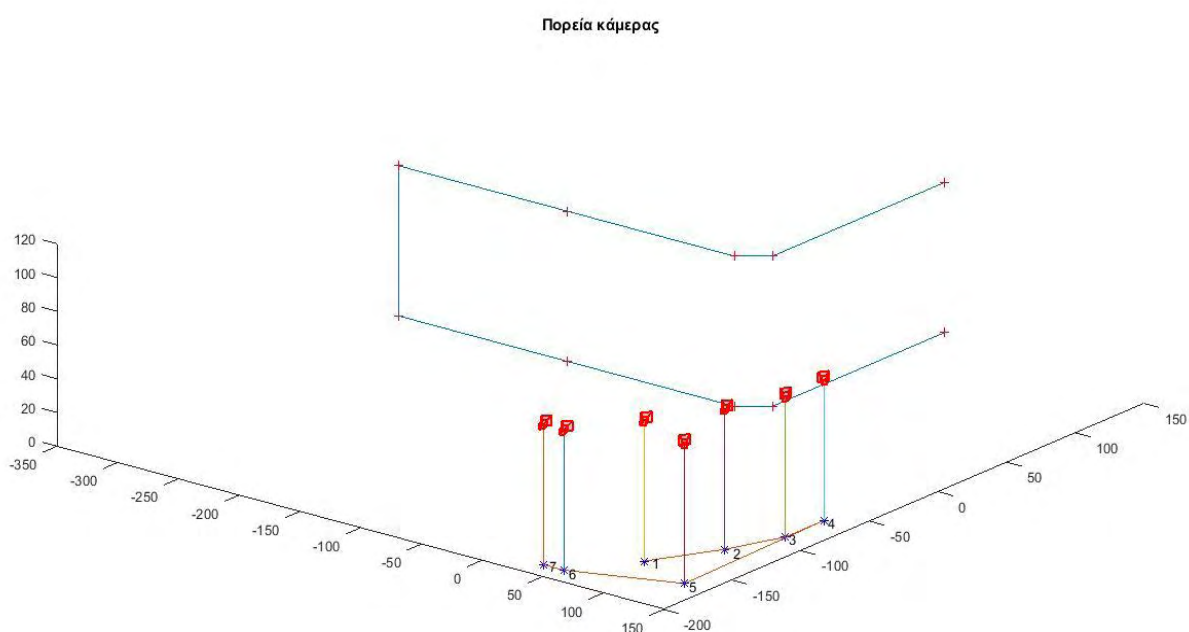
Για τον υπολογισμό του πίνακα περιστροφής, υπολογίζουμε τους αγνώστους $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$ μέσω του συστήματος (16) και κάνοντας εξωτερικό γινόμενο τη πρώτη με τη δεύτερη γραμμή του πίνακα περιστροφής, ανακτούμε τη τρίτη γραμμή με αγνώστους r_{31}, r_{32}, r_{33} [4].

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι, αντιστρέφοντας τα πρόσημα του πίνακα περιστροφής για κάποιο άξονα, το σημείο που υπολογίζουμε σε αυτή τη περίπτωση είναι ακριβώς το αντισυμμετρικό σημείο από τη πραγματική θέση. Μαθηματικά και οι δύο περιπτώσεις αποτελούν λύσεις του προβλήματος. Η ασάφεια σχετικά με το πρόσημο της λύσης, επιλύεται με βάση πρακτικούς χωρικούς περιορισμούς. Στο συγκεκριμένο πείραμα, η z-συνιστώσα της θέσης της κάμερας δε μπορεί να είναι αρνητική. Ισοδύναμα, η θέση της κάμερας δε μπορεί να βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του δαπέδου. Στην περίπτωση λοιπόν που από μαθηματική λύση προκύψει

$T_z < 0$, τότε αλλάζουμε τα πρόσημα όλων των στοιχείων της λύσης, κάτι που εκφράζεται μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} (T_x, T_y, T_z) &= -(T_x, T_y, T_z) \\ R &= -R \end{aligned} \quad (36, 37)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω δεδομένα και μέσω της σχέσης (10) μπορούμε να δείξουμε τη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας για κάθε θέση όπως φαίνεται στο Σχήμα 7:



Σχήμα 7. Θέσεις και προσανατολισμός της κάμερας για όλα τις λήψεις.

Για 7 εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, η μέση τιμή του σφάλματος των μετρήσεων είναι 5,9 εκατοστά ανά εικόνα, ενώ η απόκλιση ανά άξονα ήταν (8, 6.4, 3) cm για τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Οι αποκλίσεις των υπολογισμένων θέσεων από τις μετρήσεις

Σφάλμα υπολογισμού θέσης κάμερας (cm)				
	Άξονας X	Άξονας Y	Άξονας Z	Μέση απόκλιση εικόνας
Εικόνα 1	4	4	3	3,6

Εικόνα 2	15	16	8	13
Εικόνα 3	20	11	5	12
Εικόνα 4	9	2	2	4,3
Εικόνα 5	4	4	2	3,3
Εικόνα 6	0	2	1	1
Εικόνα 7	7	6	0	4,3

4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή υλοποιήθηκε μία μαθηματική μέθοδος εύρεσης της θέσης και του προσανατολισμού της άγνωστης κάμερας από μία μόνο λήψη που περιέχει ένα σύμβολο γνωστών σημείων. Η μέθοδος βασίζεται στη βαθμονόμησης τη κάμερας. Σε περίπτωση κάμερας άγνωστων εσωτερικών παραμέτρων, σχεδιάσαμε και διεξήγαμε πείραμα το οποίο υπολογίζει τις εσωτερικές παραμέτρους με γνωστή τη θέση της κάμερας στο χώρο. Σύμφωνα με τα πειράματα, η μέση τιμή του σφάλματος της θέσης της κάμερας ήταν είναι 5,9 εκατοστά ανά εικόνα, ενώ το μέσο σφάλμα ανά άξονα κυμαίνεται από 3 cm έως 8 cm .

Η μέθοδος που ακολουθήσαμε είναι επιρρεπής σε θόρυβο και τα αποτελέσματα εξαρτώνται πολύ από την ακρίβεια των συντεταγμένων των σημείων αλλά και τη ακριβή επιλογή των συντεταγμένων των σημείων στη εικόνα [2], [3]. Σε περίπτωση αύξησης του πλήθους των σημείων, η εξάρτηση από το θόρυβο μειώνεται.

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιωθεί αν εφαρμοστούν μέθοδοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ή /και μοντέλα παραμόρφωσης της εικόνας από την κάμερα. Για τη βελτίωση της ευελιξίας του συστήματος, μελλοντικά μπορεί να υλοποιηθεί αλγόριθμος για την αυτόματη επιλογή σημείων. Σε αυτή την περίπτωση, η εκτέλεση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά.

Αναφορές

- [1] Hartley, Richard, and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [2] Tsai, Roger Y. "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses." *Robotics and Automation, IEEE Journal of* 3.4 (1987): 323-344.
- [3] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11), 1330-1334
- [4] Horn, B. K. (2000). Tsai's camera calibration method revisited. Online: http://people.csail.mit.edu/bkph/articles/Tsai_Revisited.pdf.
- [5] Paige, Christopher C., and Michael A. Saunders. "Solution of sparse indefinite systems of linear equations." *SIAM journal on numerical analysis* 12.4 (1975): 617-629.
- [6] Baker, K. (2005). Singular value decomposition tutorial. *The Ohio State University*, 24.
- [7] Millot, Yannick, and Pascal P. Man. "Active and passive rotations with Euler angles in NMR." *Concepts in Magnetic Resonance Part A* 40.5 (2012): 215-252.
- [8] Hartley, Richard I. "In defense of the eight-point algorithm." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 19.6 (1997): 580-593.
- [9] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2000). A real-time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3D mapping. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 321-328). IEEE.
- [10] Leonard, John J., Hugh F. Durrant-Whyte, and Ingemar J. Cox. "Dynamic map building for an autonomous mobile robot." *The International Journal of Robotics Research* 11.4 (1992): 286-298.
- [11] F. Lu and E. Milios. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1998.
- [12] Agrawal, M., & Konolige, K. (2006, August). Real-time localization in outdoor environments using stereo vision and inexpensive gps. In *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on* (Vol. 3, pp. 1063-1068). IEEE.
- [13] Garcia, M. A., & Solanas, A. (2004, April). 3D simultaneous localization and modeling from stereo vision. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 847-853). IEEE.

- [14] Lu, X., & Manduchi, R. (2005, April). Detection and localization of curbs and stairways using stereo vision. In *ICRA* (Vol. 5, pp. 4648-4654).
- [15] Biswas, J., & Veloso, M. (2012, May). Depth camera based indoor mobile robot localization and navigation. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 1697-1702). IEEE.
- [16] D. Hähnel, W. Burgard, and S. Thrun. Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 44(1):15–27, 2003.
- [17] H. Durrant-Whyte and T. Bailey. Simultaneous localization and mapping: part I. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 13(2):99–110, 2006.
- [18] Choi, Byoung-Suk, et al. "A hierarchical algorithm for indoor mobile robot localization using RFID sensor fusion." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58.6 (2011): 2226-2235.
- [19] R. C. Luo, C.-T. Chuang, and S.-S. Huang, "RFID-based indoor antenna localization system using passive tag and variable RF-attenuation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Electron.*, 2007, pp. 2254–2259.
- [20] D. Hahnel, W. Burgard, D. Fox, K. Fishkin, and M. Philipose, "Mapping and localization with RFID technology," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2004, pp. 1015–1020
- [21] O. Serrano, J.M. Canas, V. Matellan, and L. Roderio. Robot localization using WiFi signal without intensity map. WAF04, March, 2004.
- [22] M. Ocana, LM Bergasa, MA Sotelo, J. Nuevo, and R. Flores. Indoor Robot Localization System Using WiFi Signal Measure and Minimizing Calibration Effort. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 1545–1550, 2005.
- [23] Biswas, J., & Veloso, M. M. (2010). Wifi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots.
- [24] Davison, Andrew J., et al. "MonoSLAM: Real-time single camera SLAM." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 29.6 (2007): 1052-1067.
- [25] Delibasis, K. K., Plagianakos, V. P., & Maglogiannis, I. (2013). Real time indoor robot localization using a stationary fisheye camera. In *Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 245-254). Springer Berlin Heidelberg.
- [26] C.G. Harris and J.M. Pike, "3D Positional Integration from Image Sequences," *Proc. Third Alvey Vision Conf.*, pp. 233-236, 1987.
- [27] M. Betke, L. Gurvits, "Mobile Robot Localization Using Landmarks", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, No 2, Page(s): 251-263,1997.
- [28] Lee, Sungho, and Inso Kweon. "Color landmark based self-localization for indoor mobile robots." *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2002.

- [29] Yoon, Kuk-Jin, et al. "Color landmark based self-localization for indoor mobile robots." *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 7.9 (2001): 749-757.

